



Совершенствование оборудования для отсева дробленого поликристаллического кремния на товарные классы

Рассматривается оборудование отсева поликристаллического кремния в рамках реализации проекта по его производству на заводе ПАО «Завод полупроводников». Специалистами ООО «КВМШ плюс» было разработано и поставлено на завод оборудование для дробления слитков поликристаллического кремния, и отсева продукта дробления на фракции по крупности. В соответствии с полученным техническим заданием, дробление слитков осуществляется операторами дробления на дробильных столах, вручную, ударным инструментом, а сев дробленого продукта осуществляется на вибрационных грохотах. Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: поликристаллический кремний, дробление, сев, слиток, установка дробления и отсева

The article considers the sizing equipment for polycrystalline silicon in frames of the project of its production implementation at the OJSC «Semiconductor Plant». The specialists of KVMSH plus Ltd. developed and delivered to the plant the equipment for polysilicon rod's crushing and the screening of crushed material by size. In accordance with the technical specifications, the crushing of rods is to be provided by operators manually on crushing table, and the sieving of crushed product is carried out by vibration screens.

Keywords: polycrystalline silicon, crushing, screening, rod, equipment for crushing and screening

Технологии отсева материалов на классы по крупности широко применяются во многих отраслях промышленности и достаточно хорошо отработаны за долгие годы своего развития.

Вибрационные грохоты, являющиеся одним из основных видов оборудования для реализации таких операций, представляют собой достаточно традиционную и хорошо проработанную область техники.

Однако дробленый поликристаллический кремний как сырье, подлежащее отсеву на классы, имеет ряд специфических особенностей, которые следует учитывать при выборе оборудования для осуществления этих операций. Главная из этих особенностей, на наш взгляд, - это высокая ценность сырья, поступающего в данную стадию в сочетании с высокой контрастностью товарной ценности продуктов отсева по классам крупности. Слиток поликристаллического кремния, поступающий в финишную операцию дробления и отсева, является дорогостоящим и высокочистым продуктом сложного и длительного технологического процесса.

При этом требования к выходу классов отсева γ , задаются в виде пороговых значений классов отсева:

Требования (1), соответственно, формулировались следующим образом: фракции (-5) мм минимизировать». «Обеспечить безусловное калибрование всего продукта по классу 100 мм, материал отсеять на классы (-100+80), (-80+20), (-20+5), (-5+0) мм при максимальном выходе фракции (-100+80) мм, выход

$$\begin{aligned} \max(\text{предельный}) &\rightarrow \gamma_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow 100 \text{ мм} \\ \text{coarse}(\text{крупный}) &\rightarrow \gamma_{\text{coarse}} \rightarrow \max \rightarrow 80 \text{ мм} \\ \text{medium}(\text{средний}) &\rightarrow \gamma_{\text{medium}} \approx \text{balance} \rightarrow 20 \text{ мм} \\ \text{fines}(\text{мелкий}) &\rightarrow \gamma_{\text{fines}} \rightarrow \min \rightarrow 5 \text{ мм} \end{aligned} \quad (1)$$

Ясно, что численные пороговые значения классов отсева могут отличаться от указанных (смотри, например, [1], где эти границы заданы в виде 4-2-1-0,5 дюйма). Эти требования обусловлены последующим использованием получаемого материала при производстве монокристаллического кремния (например, методом Чохральского) и связаны с формированием оптимального, с точки зрения обеспечения плотной упаковки, гранулометрического состава шихты, размещаемой в плавильном тигле.

Тем не менее, вне зависимости от конкретных численных значений классов отсева, общий вид требований (1), очевидно, не изменяется, т.к. эти требования отражают реальную ценностную шкалу получаемых классов отсева, имеющую вид

$$C_{\text{coarse}} > C_{\text{medium}} \gg C_{\text{fines}}, \quad (2)$$

где C – ценностная функция, в простейшем случае, цена.

Таким образом, в стадии дробления и отсева происходит снижение ценности продукта технологии на величину

$$\Delta C = C_0 - fi \sum_{fine}^{coarse} C_i \cdot \gamma_i \quad (3)$$

где C_0 – «исходная ценность» слитка, которая была бы сохранена при оптимальном, с упомянутой точки зрения использования продуктов при последующей переработке, соотношении выходов крупных и средних классов и отсутствии мелких классов

$$\begin{aligned} \gamma_{coarse} &\rightarrow \max \\ \gamma_{medium} &\approx \text{optimal} \\ \gamma_{coarse} & \\ \gamma_{fines} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, что именно требование минимизации величины снижения ценности продукта технологии $\Delta C \rightarrow \min$ подразумевает при формулировании технических требований, подобных (1).

С этой точки зрения необходимо выделить два основных технических фактора, которые могут снижать ценность получаемого продукта.

1. Дополнительное разрушение кондиционных кусков материала в процессе отсева под действием вибрационного поля.

2. Возможное микрозагрязнение высокочистого поликристаллического кремния посторонними примесями за счет износа элементов отсева устройства и дробилки высокообразивным поликристаллическим кремнием. В соответствии с существующими представлениями, разрушение материала в вибрационном поле имеет инерционную природу. Основные механизмы такого разрушения – это удар и истирание. Поэтому обобщенную вероятность разрушения куска, соответствующую фактору I, можно представить в виде

$$P_I = f\left(\frac{A\omega^2}{g}; d^3; d^2; t\right) \quad (5)$$

где A , ω – соответственно амплитуда и частота вибраций, задающие величину вибрационного ускорения, равного $A\omega^2$; g – ускорение свободного падения, а величина

$$\frac{A\omega^2}{g} = K_v \quad (6)$$

трактруется в вибрационной механике как коэффициент вибрационного режима K_v , характеризующий интенсивность сил инерции, действующих на куски материала в вибрационном поле; d – обобщенный размер куска, присутствующий как в третьей степени, (что отражает линейное влияние массы куска на величину инерционной силы и, следовательно, ударный механизм разрушения); так и во второй степени (что отражает роль свободной поверхности куска при разрушении истиранием); t – время пребывания материала в технологической операции, – этот фактор учитывает вероятностную природу процесса разрушения куска.

Также следует иметь в виду дополнительное вли-

яние масштабного фактора, проявляющегося в том, что удельные разрушающие напряжения для тел, имеющих внутренние трещины, нелинейно уменьшаются с увеличением их размеров [2]. Слитки поликристаллического кремния содержат внутренние трещины [3, 4], поэтому проявление масштабного фактора следует считать весьма вероятным. Таким образом, склонность кусков материала к разрушению для крупных фракций значительно выше, чем для мелких.

С другой стороны, вероятность микрозагрязнения куска поликристаллического кремния, соответствующая фактору II, в любом случае пропорциональна: с одной стороны, – свободной поверхности куска, и с другой, – времени пребывания материала в технологической операции

$$P_{II} = f(d^2; t) \quad (7)$$

Обобщенно характеризуя вероятность снижения ценности продукта технологии, понимаемого нами в соответствии с выражением (3), под действием основных факторов I и II, можем видеть, что

$$P_{\Delta C} = f(K_v; d^n; t) \quad (8)$$

где показатель n , выше, чем 2.

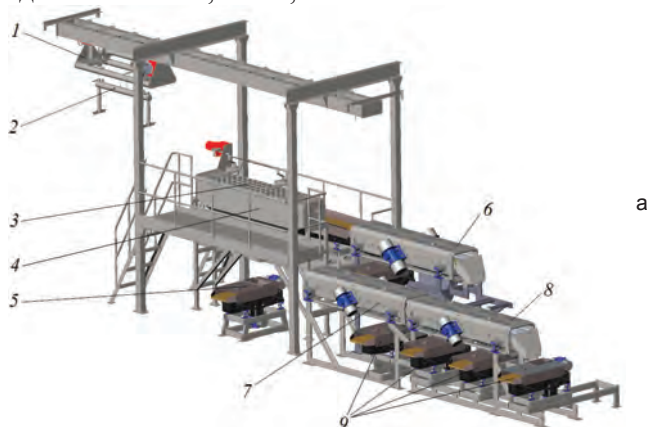


Рис. 1. Установка дробления и отсева поликристаллического кремния: а – общий вид установки; б – промышленный вариант установки в цехе ПАО «Завод полупроводников»

Крупные классы перерабатываемого материала являются не только наиболее ценными, но и вносят риски в передрабывании и загрязнении кондиционных продуктов, в отличие от средних и мелких классов, значительно более подвержены действию факторов,

снижающих ценность продукции.

В соответствии с полученным техническим заданием, в ПАО «Завод полупроводников» специалистами ООО «КВМШ плюс» разработано и поставлено оборудование для дробления слитков поликристаллического кремния, и отсева продукта дробления на фракции по крупности.

Общий вид установки и ее промышленный вариант, установленный в цехе ПАО «Завод полупроводников» приведен на рис. 1. Основными элементами установки (рис. 1а) является перегрузочная тележка 1, устройство для захвата слитков 2, дробильный стол 3, питатель кондиционного продукта 4, питатель некондиционных частей слитка 5, грохот крупных классов 6, промежуточный питатель 7, грохот средних и мелких классов 8, поперечные разгрузочные питатели 9. Установка работает следующим образом. Слитки поликристаллического кремния доставляются на тележках к установке дробления, где с помощью перегрузочной тележки 1 (рис. 1) с устройством захвата 2, подаются на дробильный стол 3 с приводными приспособлениями для укладки слитка. Кондиционные части слитка питателем 4 проходят две стадии грохочения, а некондиционная часть дробленого материала отводится питателем 5, который расположен под дробильным столом. В первой стадии грохочения (рис. 2) кондиционный продукт, подаваемый питателем 1 на грохот крупных классов 2, последовательно отсеивается на ситах с ячейкой 100 и 80 мм на классы (+100); (-100+80), (-80) мм. Надрешетный класс (+100 мм), если он присутствует, выгружается в контейнер и возвращается на дробильный стол для додробливания.

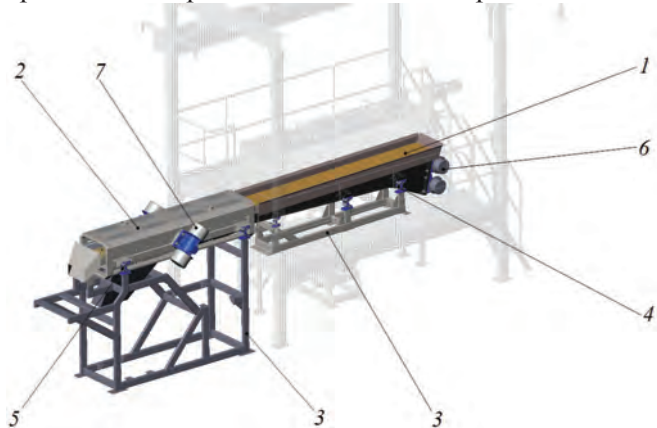


Рис. 2. Первая стадия грохочения

На второй стадии грохочения (рис. 3) фракция (-100+80) мм, представляющая основной целевой продукт, сразу выводится из процесса посредством поперечного питателя 1. Класс (-80) мм, подлежащий последовательному отсеиванию на мелкие и средние классы, поперечным питателем 2 транспортируется на промежуточный питатель 6 и далее на грохот средних и мелких классов 7, на котором происходит последовательное выделение фракций (-5), (-20+5), (-80+20) мм. Эти продукты выводятся из схемы переработки поперечными разгрузочными питателями 3, 4, 5. Все вибрационные машины установлены на рамах 3 (рис. 2), 8, 9, 15, 21, 22, 23 (рис. 3) посредством виброопор 4, 5 (рис.

2) 11, 13, 17, 19, 24 (рис. 3) и приводятся в действие самосинхронизирующимися мотор-вибраторами 6, 7 (рис. 2), 12, 14, 18, 20, 28 (рис. 3). Рамы поперечных питателей дополнительно снабжены направляющими 10, 16, 25, 26, 27 (рис. 3), позволяющими выкатывать питатели из-под грохота для обслуживания, что обеспечивает доступ ко всем их элементам.

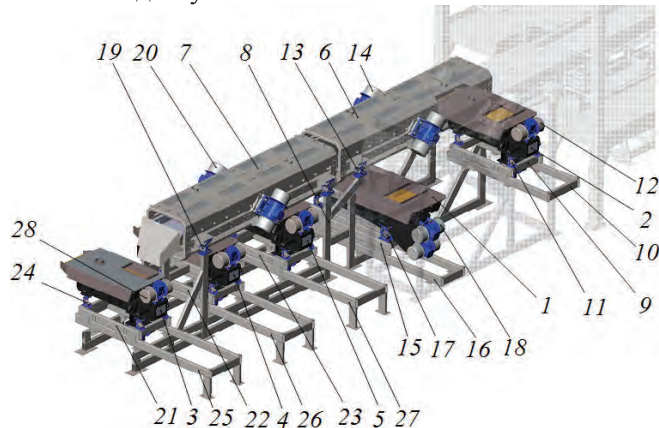


Рис. 3. Вторая стадия грохочения и выдача продуктов

Выводы

Анализ технологии и оборудования для рассматриваемого проекта показал следующее:

1. Технологическая схема отсева должна обеспечивать первоочередной отсев целевой крупной фракции и как можно более оперативное выведение из процесса с целью снижения времени ее пребывания в технологической операции.
2. Применяемые динамические вибрационные режимы отсева должны быть низкоинтенсивными, что обеспечивает низкий уровень действующих вибрационных нагрузок, минимум ненужных контактных взаимодействий, которые могли бы вызывать дополнительное разрушение кусков готовых фракций.
3. Номенклатура материалов, применяемых для изготовления поверхностей грохотов, контактирующих с перерабатываемым материалом, ограничена нержавеющей сталью и полиуретаном контролируемого состава с целью минимизации риска микрозагрязнения продукта.

Библиографический список

1. Patent EP0329163 (A2). Int. Cl. B28D5/00 Method for forming presized particles from silicon rods. Publication date: 1989-08-23.
2. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твёрдых тел. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
3. Чащинов Ю.М., Фалькевич Э.С., Петрик А.Г. и др. Исследования трещинообразования в стержнях кремния // Цветные металлы. – 1986. – № 4. – С. 65-67.
4. Кисарин О.А., Яркин В.Н., Реков Н.М., Червоный И.Ф. Трещинообразование в кремниевом стержне большого диаметра // Металлургия. Сб. науч. раб. - 2010. - Вып. 21. - С. 125-131.

Поступила 11.03.2013